

平成30年6月23日現在

機関番号：82636

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13387

研究課題名（和文）単一光子を用いた意思決定機能構築の研究

研究課題名（英文）Decision making based on single photons

研究代表者

成瀬 誠（Naruse, Makoto）

国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワークシステム研究所・総括研究員

研究者番号：20323529

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：意思決定問題は、情報通信技術等の広範な応用の根底にある重要課題である。しかし、動的に変化する不確実な環境での意思決定とは、ベターな選択肢の探索と速やかな決断という難しいトレードオフを孕んだ「多本腕バンディット問題」であり、その解決は容易ではない。本研究の目的は、計算機上のアルゴリズムではなく、光の物理的性質を生かして意思決定機能を開拓することである。本研究では、単一光子の有する粒子と波動の二重性を意思決定機能に応用することを見出し、そのシステム構造を提案し、さらに実験により原理を実証した。さらに、圏論を用いて、単一光子を用いた意思決定システムの構造的な理解を深めることに成功した。

研究成果の概要（英文）：Decision making is a vital function in this age of machine learning and artificial intelligence. In this study, we demonstrated that single-photons can be used to make decisions in uncertain, dynamically changing environments. The multi-armed bandit problem was successfully solved using the dual probabilistic and particle attributes of single photons. Furthermore, we showed a category theoretic modeling and analysis of single-photon-based decision making. The category theoretic model reveals the complex interdependencies of subject matter entities in a simplified manner.

研究分野：光工学

キーワード：単一光子 意思決定

### 1. 研究開始当初の背景

意思決定問題は、通信網等のインフラ最適化、ネットワークサービス、衝突回避を含めた輸送システム、医学・製薬など、情報通信技術関連の広範かつ重要な応用の根底にあり、機械学習・人工知能の基礎問題として熱心に研究されている。しかし、動的に変化する不確実な環境での意思決定とは、ベターな選択肢の探索と速やかな決断という難しいトレードオフを孕んだ「多本腕バンディット問題 (Multi-armed bandit problem (MAB))」であり、その解決は容易ではない。本研究の目的は、(計算機上のアルゴリズムではなく) 光の物理的性質を生かして意思決定機能を開拓することである。研究代表者は先行研究において、近接場光を用いた意思決定の理論的可能性を示していた。しかしながら、光の物理的性質をより有効に活用するには、光の量子性をさらに積極利用することが不可欠であった。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、世界にさきがけ、単一光子を意思決定に展開することにチャレンジする。単一光子の有する粒子と波動の二重性を意思決定機能に応用することが可能かを明らかとすることを目的とする。可能な場合はその理論基盤を掘り下げる。

### 3. 研究の方法

量子光学の理論を用いて単一光子検出と意思決定機能を結びつけるシステムアーキテクチャを検討し、モデル計算により MAB 解決の可能性を検証する。その上で、MAB 解決が可能と判明したときは、圏論などの抽象数学を駆使して単一光子を用いた意思決定システムの詳細構造を分析し動作メカニズムの理解を深める。

また本挑戦的萌芽研究における単一光子意思決定システムアーキテクチャの検討を受けて、実際の単一光子源を用いた実験的取り組みを推進し、単一光子意思決定の実証を目指す。

### 4. 研究成果

#### (1) ターゲット課題の設定: 多本腕バンディット問題 (MAB)

動的に変化する不確実な環境において効率的な意思決定を実現するには、複数の選択肢から報酬が得られる確率が最も高いものができるだけ速く正確に選択する必要がある。このとき、すべての選択肢の報酬確率を正確に見積もるためには、十分な検証が求められる。正確さを追求し過ぎると、この検証に要する探索コストがかさみ、利益を損ねてしまう。しかし、探索を早急に打ち切ると、報酬確率の低い選択肢に投資して損をするリスクが高くなる。このような探索の「正確さ」と「速さ」とのトレードオフは、効率的な意思決定が要求される様々な局面に普遍

的に存在し、「探索と決断のジレンマ」(exploration-exploitation dilemma)と呼ばれている。このような意思決定問題を表象した「多本腕バンディット問題 (Multi-Armed Bandit problem: MAB)」とは、異なる確率で報酬が得られる複数のスロットマシンの中から、獲得報酬を最大化できるものを探り当てる課題である。MAB は、通信網等のインフラ最適化(周波数割り当て等)、モンテカルロ木探索、ネットワークサービス、衝突回避を含めた輸送システム、医学・製薬での臨床試験 (clinical trial) などの多くの重要な応用に直結することから、機械学習・人工知能の分野で熱心に研究されている。

#### (2) 単一光子を用いた意思決定システムアーキテクチャ (Single-photon decision maker)

本研究は、単一光子の持つ粒子性と確率性を世界に先駆けて MAB 解決に展開した。

2台のスロットマシン(L, R)から報酬確率の高いものを選択する問題(2本腕バンディット問題)を考える。偏光ビームスプリッタ(PBS)に対して45度傾いた偏光を有する単一光子が入射したとする(図1(i))。単一光子は、PBSにより、確率1/2でチャンネル0又はチャンネル1に向かう。ただし、チャンネル0で単一光子が検出されたときには、チャンネル1での観測確率は0となる。このような、確率的でありかつ粒子的であるという単一光子の物理的性質を、意思決定問題の解決に展開する。PBSに対してほとんど水平の偏光を有する単一光子が入射したときは(図1(ii))、ほとんど1の確率で光子はチャンネル0に向かう。ただし、僅かな確率でチャンネル1で光子が検出される契機も残されている。同様に、PBSに対してほとんど垂直の偏光を有する単一光子が入射したときは(図1(iii))、ほとんど1の確率で光子はチャンネル1に向かうが、わずかな確率でチャンネル0においても光子は検出され得る。このように、単一光子の行き先は偏光に依存して確率的に異なるが、個々のイベントは光の粒子性のため確実に決まる。我々の提案したシステムでは、チャンネル0で光子が検出されたときは、ただちに、スロットマシンLを選ぶ意思が決定されたと見なし、チャンネル1での光子検出はマシンRを選択する意思の決定と対応付ける。

このシステムアーキテクチャに基づき、実験では、単一光子源としてダイヤモンド中の窒素欠陥を用い、偏光子、半波長板、PBS通過後の光子を2チャンネルの単一光子検出器で計測した。時間相関単一光子計数システムにより光子到着タイミングを検出し、これを意思決定に用いた。選択したスロットマシンからの報酬に基づいて半波長板の回転角を調節し、単一光子の偏光状態を制御した(図2)。単一光子に関しては、フランス・CNRS(グルノーブルのInstitut Neel)と共同した。

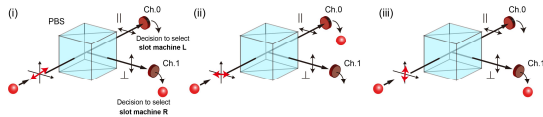


図1 単一光子の確率性と粒子性の意思決定問題への応用原理

代表的な結果を図3に示す。横軸はスロットマシンの試行回数、縦軸は「正解率(報酬確率が高い方のスロットマシンを選択した割合)」を示す。最初の150サイクルではスロットマシンLとRの報酬確率はそれぞれ0.8、0.2と設定してある。よって、スロットマシンLの選択が「正解」である。時間の経過とともに正解率が1に漸近していることがわかる(実線)。さらに、環境が不確実に変化することを表現するため、150サイクルごとにスロットマシンLとRの報酬確率を反転(0.8を0.2に、0.2を0.8にスイッチ)させる。この結果、報酬確率の反転直後に正解率は急激に低下するが、時間の経過とともに回復し、やがて1に漸近している。これは、システムが自律的に環境変化を検知し、正しい意思決定を実現していることを示す。点線はスロットマシンの報酬確率を0.6と0.4に設定した場合の結果である。報酬確率の差が小さいため、より難易度の高い意思決定問題を設定したことに対応する。正解率はやや低下するが、依然として自律的に正しい意思決定を実現していることが分かる。

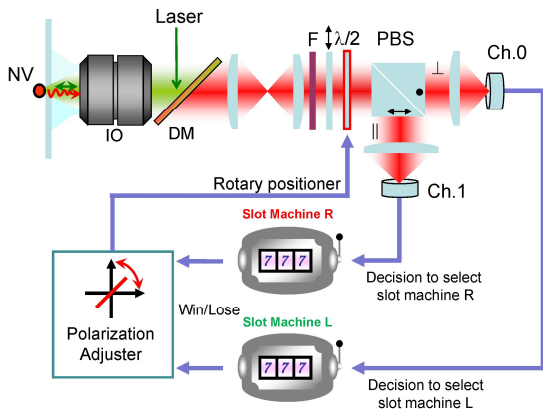


図2 単一光子を用いた意思決定システムのアーキテクチャ

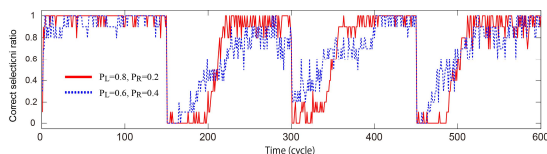


図3 単一光子意思決定の実験結果

### (3) 圏論(Category theory)を用いた理論基盤の検討

単一光子意思決定システムは、単一光子の偏光状態とそれに応じた意思決定、選択されたスロットマシンからの報酬の確率的な有無、さらにスロットマシンの報酬確率の変化

など、複数の要素が複雑に絡み合って動作しており、今後のシステムの高度化や応用展開を見据えると、理論的基盤を明確な形で構築し、全体のシステム構造を捉えることが不可欠と言える。本研究では、「意思決定(スロットマシンの選択)」と「選択したマシンの報酬の有無」を、各々、単一光子の偏光状態( $\phi/2$ )と外部からは不可知のスロットマシンのセッティング( $\theta/2$ )としてモデル化し、 $\phi$ が自律的に $\theta$ の方向に時間発展することを示した。さらに、圏論を規範として、本システムは、「三角圏」で知られている「8面体図式」を満たすことを見出した(図4)。この考察によって、自律的に性能を改善できるシステム要素と、不確実性を解除不可能なシステム要素の依存関係を明確に図式化・整理・評価することが可能となった。

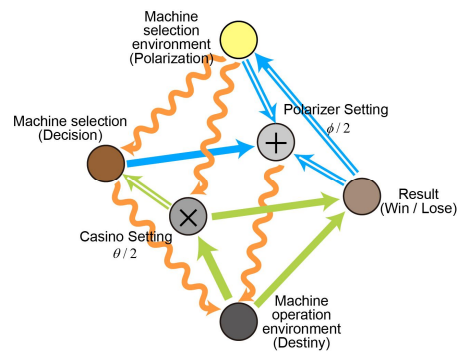


図4 8面体図式を用いた単一光子意思決定システムの構造説明

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計9件)

M. Naruse, S.-J. Kim, M. Aono, M. Berthel, A. Drezet, S. Huant, H. Hori, Category Theoretic Analysis of Photon-based Decision Making, International Journal of Information Technology & Decision Making, in press. DOI: 10.1142/S0219622018500268 (査読有)

T. Takahashi, S.-J. Kim, M. Naruse, A note on the roles of quantum and mechanical models in social biophysics, Progress in Biophysics and Molecular Biology, Vol. 130, Part A, pp. 103-105, 2017. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2017.06.003 (査読有)

M. Naruse, M. Aono, S.-J. Kim, H. Saigo, I. Ojima, K. Okamura, H. Hori, Category Theory Approach to Solution Searching based on Photoexcitation Transfer Dynamics, Philosophies, Special Issue "Natural Computation: Attempts in Reconciliation of Dialectic Oppositions", Vol. 2, No. 3, pp. 16, 2017. DOI: 10.3390/philosophies2030016 (査読有)

金 成主、成瀬 誠、青野真士、人工知能から自然知能へ：自然に潜む計算能力の活用、電子情報通信学会論文誌 C 第 J100-C 巻、第 6 号、pp. 261-268, 2017. (査読有)

M. Naruse, S.-J. Kim, T. Takahashi, M. Aono, K. Akahane, M. D'Acunto, H. Hori, L. Thylen, M. Katori, M. Ohtsu, Percolation of optical excitation mediated by near-field interactions, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Vol. 471, pp. 162-168, 2017. DOI:

10.1016/j.physa.2016.12.019 (査読有)

M. Naruse, M. Berthel, A. Drezet, S. Huant, H. Hori, S.-J. Kim, Single Photon in Hierarchical Architecture for Physical Decision Making: Photon Intelligence, ACS PHOTONICS, Vol. 3, No. 12, 2505-2514, 2016. DOI: 10.1021/acsphotonics.6b00742 (査読有)

J. Lee, F. Peper, S. D. Cotofana, M. Naruse, M. Ohtsu, T. Kawazoe, Y. Takahashi, T. Shimokawa, L. B. Kish, T. Kubota, Brownian Circuits: Designs, International Journal of Unconventional Computing, Vol. 12, No. 5-6, pp. 341-362, 2016. (査読有)

S.-J. Kim, M. Naruse, M. Aono, Harnessing the Computational Power of Fluids for Optimization of Collective Decision Making, Philosophies, Special Issue "Natural Computation: Attempts in Reconciliation of Dialectic Oppositions", Vol. 1, No. 3, pp. 245-260, 2016. DOI:

10.3390/philosophies1030245 (査読有)

M. Naruse, M. Berthel, A. Drezet, S. Huant, M. Aono, H. Hori, S.-J. Kim, Single-photon decision maker, SCIENTIFIC REPORTS, Vol. 5, Article No. 13253, 2015. DOI: 10.1038/srep13253 (査読有)

[学会発表](計 7 件)

M. Naruse, A. Uchida, S.-J. Kim, Decision Making by Photonics, Mo3A-1, 12th IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC 2017) (Singapore, 2017.10.2) (Invited)

M. Naruse, M. Berthel, A. Drezet, S. Huant, H. Hori, S.-J. Kim, Decision making by photonics: experiment and category theoretic foundation, Unconventional Computation and Natural Computation 2017 (Fayetteville, 2017.6.8) (Invited Tutorial)

M. Naruse, T. Nakao, H. Hori, E.

Yamamoto, T. Akimoto, G. Northoff, Local reservoir modeling for choice-based learning of internally- and externally-guided decision making, 11th International Workshop on Natural Computing, Book of Abstracts, pp. 9-10 (Akita, 2017.5.13)

M. Naruse, Photon Intelligence: Single-Photon Decision Maker and Its Category Theoretic Foundation, Digital Holography & Information Photonics 2016 (DHIP2016), Invited, Inv21-p4, pp. 77-78 (Sapporo, 2016.12.21)

M. Naruse, Decision Making by Photonics, Workshop on \*Proto-computation and Proto-life\* in Harvard University (2016.12.10 Cambridge) (Invited)

M. Naruse, S.-J. Kim, M. Aono, M. Berthel, A. Drezet, S. Huant, H. Hori, Single-photon-based decision making: experiment and category theoretic foundation, 10th International Workshop on Natural Computing (IWNC 10) (Akita, 2016.5.14)

M. Naruse, M. Aono, H. Hori, S.-J. Kim, Natural Intelligence: Single-Photon Decision Maker, Proceedings of 4th Korea-Japan Joint Workshop on Complex Communication Sciences (KJCCS'16), J-Invite (Nozawa onsen, 2016.1.12) (Plenary)

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/makotonaruseweb/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

成瀬 誠 (NARUSE, Makoto)

情報通信研究機構・ネットワークシステム研究所・総括研究員

研究者番号：20323529

### (2) 研究分担者

金 成主 (KIM, Song-Ju)

慶應義塾大学・政策・メディア研究科・特任准教授

研究者番号：30455456

高橋 泰城 (TAKAHASHI, Taiki)

北海道大学・文学研究科・准教授

研究者番号：60374170